

ANTECIPAÇÃO DO RMR EM DOIS TIPOS DE MACIÇOS - METASSEDIMENTAR E GRANÍTICO

ESTIMATION OF RMR VALUE IN TWO TYPES OF ROCK MASS - METASSEDIMENTARY AND GRANITIC

Santos, Vítor; *Geoárea, Alfragide, Portugal, silva.santos@gmail.com*

Silva, Paula F. da; *GeoBioTec & Departamento Ciências da Terra - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA), Caparica, Portugal, apfs@fct.unl.pt*

Brito, M. Graça; *GeoBioTec & Departamento Ciências da Terra FCT NOVA, Caparica, Portugal, mgb@fct.unl.pt*

RESUMO

O conhecimento e antecipação da qualidade do maciço rochoso ao longo da escavação de um túnel é relevante para o sucesso da escavação em condições de estabilidade e segurança, garantido o respeito pelos prazos e custos financeiros previstos. A qualidade do maciço rochoso é frequentemente avaliada pelo valor de RMR (Bieniawski, 1989) e a sua estimação em avanço permite antecipar cenários, analisar os riscos geotécnicos envolvidos e adequar os procedimentos construtivos. Recorrendo a um estudo geoestatístico deste índice, compara-se a qualidade de dois tipos de maciços rochosos, um granítico e outro metassedimentar, durante a escavação de túneis, assim como a capacidade de modelar em antecipação, por krigagem normal, essa mesma qualidade. Esta comparação permite tecer considerações sobre a aplicabilidade dos métodos de estimação geoestatística para antecipar mudanças de qualidade do terreno na construção de túneis e em que medida a litologia condiciona essa análise.

ABSTRACT

The knowledge and anticipation of the quality of the rock mass in tunneling is relevant for the success of the construction work ensuring its stability and security as well as keeping the construction in time and in budget. The quality of the rock mass is usually assessed by the RMR index (Bieniawski, 1989) and its estimation in advance allows to analyze the inherent geotechnical risks, anticipating scenarios and adjusting the construction methods. In the framework of drill and blasting tunneling for two hydropower schemes, in granite and metasedimentary rock masses, the quality of those rock masses is evaluated through forecasting their RMR value by using ordinary kriging and also comparing the error of modelling it. This methodology allows to consider the applicability of geostatistical estimation methods to anticipate changes in ground quality during tunneling and to what extent the lithology conditions this analysis.

1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento da qualidade do maciço rochoso presente ao longo da escavação de um túnel é relevante para o sucesso da construção em condições de estabilidade e segurança, bem como para o cumprimento dos prazos e custos financeiros previstos.

No projeto de empreendimentos, em particular no caso dos aproveitamentos hidroelétricos, a componente geológica é um dos diversos fatores relevantes tidos em consideração nas análises de soluções alternativas, definição de pressupostos e desenvolvimento do projeto.

Na construção destas estruturas, a presença de um maciço heterogéneo e consequentemente com qualidade variável implica que, na fase de projeto, se considerem vários tipos de sustento, e que fiquem disponíveis os diferentes tipos de equipamento para a sua aplicação na fase construtiva. Às vezes, a heterogeneidade e especificidade das situações encontradas durante a escavação implicam ainda a necessidade de adequar os procedimentos construtivos.

As classificações geomecânicas permitem categorizar a qualidade de um maciço rochoso e acompanhar, na fase construtiva, a sua variação ao longo do alinhamento do túnel. A antecipação dessa qualidade durante uma escavação em subterrâneo, nomeadamente recorrendo a explosivos, permite determinar os riscos potenciais envolvidos e adequar, atempadamente, os métodos construtivos, garantindo a estabilidade, a segurança e a otimização de recursos.

Segundo Castro-Fresno et al. (2010), de entre as classificações geomecânicas mais utilizadas em todo o mundo destaca-se a de Bieniawski (1989) e o sistema Q, verificando-se que ambas não consideram a tipologia do maciço em que são aplicadas. A primeira classificação permite a determinação do valor de

RMR, o qual representa a qualidade do maciço rochoso numa escala de 0 a 100, tornando-a portanto mais amigável de ser utilizada. Na sua aplicação a túneis, o valor de RMR tem sido alvo de estimação por diversos autores, com base em resultados quer de sondagens, quer de estudos geofísicos e de reconhecimentos de superfície (Barla et al., 1987; Ryu et al., 2003; Oh et al., 2004; You e Lee, 2006; Stavropoulou et al., 2007; Choi et al., 2009; Yi et al., 2014; Pinheiro et al., 2016). Existem ainda outros investigações (Exadaktylos e Stavropoulou, 2008; Santos et al., 2014) que visaram, com base no índice RMR, antecipar a qualidade do maciço rochoso na frente de escavação.

A maioria destes estudos recorreu a métodos geoestatísticos para estimar os valores de RMR, verificando-se que existem limitações à sua utilização em terrenos heterogêneos, uma vez que os modelos não conseguem reproduzir, com rigor, variações bruscas na qualidade do maciço, como por exemplo as decorrentes da presença de filões, de falhas ou de zonas tectonizadas (Kaewkongkaew et al. 2015).

Neste contexto e considerando a problemática do estudo do volume elementar representativo de um dado maciço rochoso, isto é, do efeito de escala e da representatividade da amostragem, na escavação em subterrâneo sob condições geológicas e geotécnicas variáveis, impõe-se a discussão da influência do contexto geológico na qualidade do maciço rochoso e na capacidade dos modelos anteciparem a sua variação ao longo do alinhamento do túnel. Ao analisarem um túnel com trechos em contextos geológicos distintos, Olivença e Santos (2014) focam o aspeto da sua influência nos valores de RMR, realçando que o peso de cada característica do maciço pode variar com a geologia.

O objetivo do presente artigo é recorrer a um estudo geoestatístico do RMR, por krigagem normal, e comparar a qualidade de dois tipos de maciços rochosos, um granítico e outro metassedimentar, durante a escavação de túneis, e avaliar a eficiência destes modelos em preverem essa mesma qualidade conferindo os resultados dos valores de RMR reais *versus* estimados. Esta metodologia permite ainda tecer considerações sobre a eventual influência da litologia nessa análise.

2 - METODOLOGIA

A metodologia selecionada consiste na análise dos resultados da estimação dos valores de RMR para o avanço seguinte de uma escavação subterrânea em dois maciços rochosos diferentes - um granítico e outro metassedimentar; estes valores são depois comparados com os valores reais obtidos durante a obra. Os dois túneis foram escavados com recurso a explosivos e foram realizados por avanços sucessivos com comprimentos dependentes das respetivas características mecânicas.

Para o efeito é desenvolvido um novo modelo que, recorrendo a krigagem normal, inclui todos os valores de RMR dos avanços anteriores e estima-se o valor deste índice para o avanço seguinte, conforme se representa na Figura 1. Do exposto ressalta que esta metodologia não pode ser utilizada para a zona dos emboquilhamentos, na medida em que têm de existir trechos previamente escavados para se poder efetuar a estimação geoestatística para o avanço seguinte.

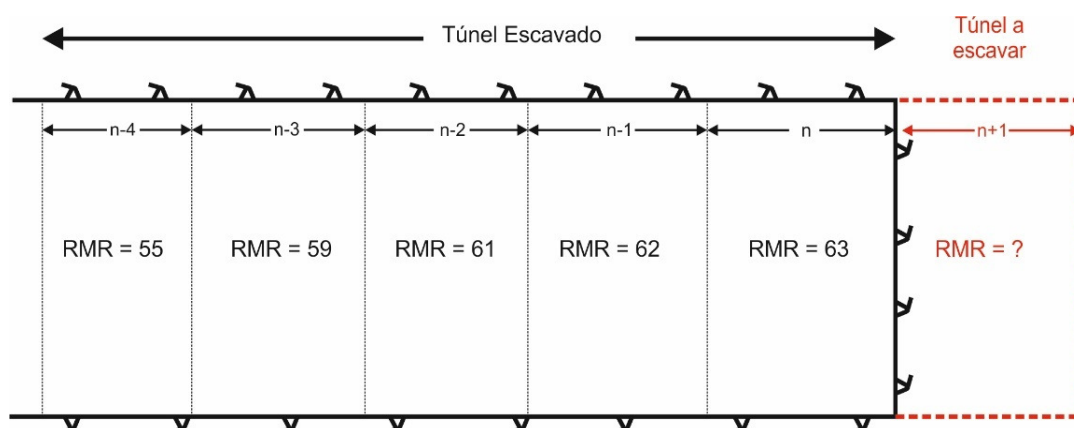


Figura 1 - Esquema de previsão da qualidade do terreno para o trecho a escavar (Santos et al., 2014)

Concretizando, recorreu-se a um programa da especialidade para aplicação da krigagem. Pela metodologia de estimação descrita, todos os valores do índice RMR observados até à frente de escavação n servem de base ao cálculo do semivariograma experimental, de forma a determinar o seu desenvolvimento espacial. Por este método, o semivariograma de um determinado parâmetro - no caso o valor de RMR, pode ser específico para cada direção do espaço no maciço rochoso; no entanto e num túnel, este fenómeno assume contornos menores, uma vez que interessa estudar o comportamento da variável ao longo do respetivo alinhamento. Como tal e para simplificação, admitiu-se que o túnel se desenvolvia sempre com a mesma direção.

Do semivariograma experimental, resulta a equação da curva que melhor ajuste apresenta aos resultados observados, tendo por base o modelo esférico. Com o modelo definido é possível estimar os valores de RMR para além da frente n em observação, até onde se registaram as características do maciço que definiram a sua qualidade; isto significa que não se efetua uma interpolação de valores, mas uma extrapolação; contudo, ela é realizada ainda dentro da extensão máxima de correlação dos valores definidos no semivariograma, obtendo-se deste modo o valor de RMR para o trecho seguinte, $(n+1)$, a escavar.

Com o avanço sucessivo da escavação é possível observar o maciço, classificá-lo e determinar o valor de RMR real. Este valor é então comparado com o estimado, em antecipação, para o mesmo trecho pelo modelo matemático e calcula-se o erro absoluto da estimação.

Os resultados obtidos, quer dos valores de RMR observados e estimados, quer do erro, são comparados entre os dois casos de estudo, ainda que estejam inseridos em contextos geológicos diferentes.

3 - CASOS DE ESTUDO: ENQUADRAMENTO

Os dois túneis selecionados correspondem a dois reforços de potência de aproveitamentos hidroelétricos já em exploração há vários anos. Correspondem a locais onde já existiam outros circuitos hidráulicos e, portanto, um conhecimento prévio das características dos correspondentes maciços que permitiu selecionar adequadamente os novos alinhamentos para implementação das novas estruturas.

Os casos de estudo selecionados são:

- Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva (AHA) - localizado num maciço metassedimentar;
- Aproveitamento Hidroelétrico de Picote (AHP) - localizado num maciço granítico.

Estes dois casos de estudo inserem-se em contextos geológicos regionais distintos, com história geológica diversa, nomeadamente foram afetados por diferentes fases orogénicas ou com diferentes intensidades, situando-se um no Norte e outro no Sul de Portugal.

O Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva localiza-se no SE de Portugal Continental e enquadra-se na região morfoestrutural da Zona de Ossa Morena. As litologias ocorrentes derivam de evolução metamórfica complexa e forte deformação tangencial, inserida no setor Moura-Ficalho do domínio Évora-Beja - Figura 2.

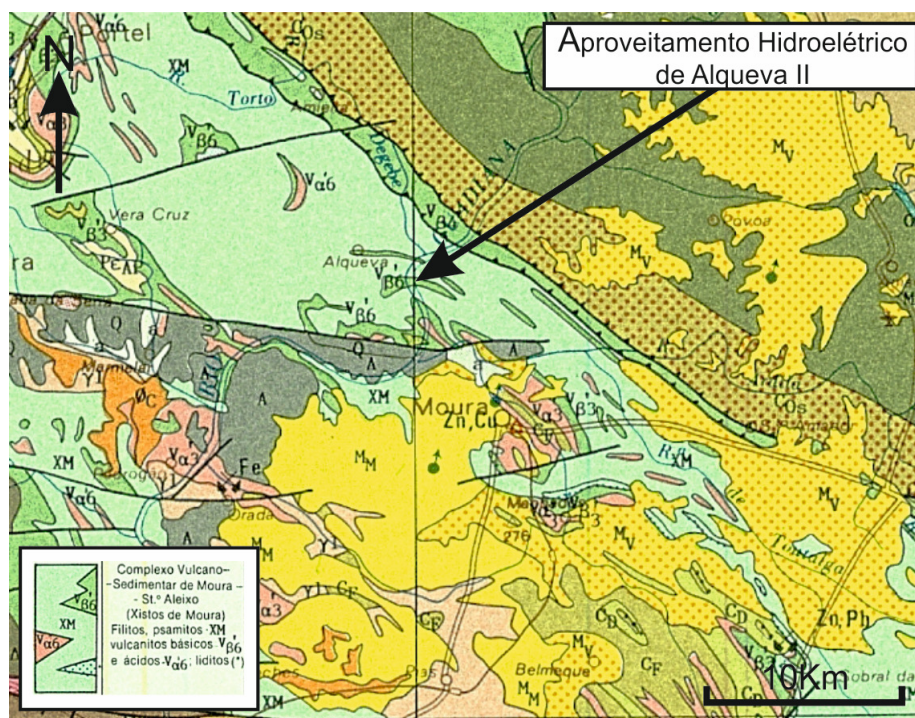


Figura 2 - Infografia do enquadramento geológico do Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva

(adaptado de Oliveira et al., 1992)

A estrutura tectónica presente à escala regional resume-se a um antiforme resultante do empilhamento de carreamentos sucessivos originados pela Orogenia Varisca.

O local conta com a presença de rochas verdes da Série Cristalofílica, azóica (Barros et al., 1970), também conhecidos por Xistos de Moura e que, mais recentemente, foram designadas por Complexo Vulcano Sedimentar de Moura-Santo Aleixo (Araújo et al., 2006). Nos estudos de projeto realizados pela COBA (2007), a geologia interessada foi descrita como uma sucessão interestratificada de metavulcanitos, onde predominam os tufos e as lavas de natureza bimodal, e os metassedimentos constituídos por xistos, filitos e rochas carbonatadas marmorizadas. Estas litologias correspondem às seguintes unidades do complexo vulcano-sedimentar:

- Unidade constituída por filádios, que não é intersectada pela obra, e correspondem a bancadas de espessura variada, desde milimétrica a métrica, de granularidade igualmente variável, com tonalidades cinzentas a acastanhadas e brilho acetinado.
- Unidade constituída por xistos verdes que se apresenta em bandas estratiformes, maciças ou laminadas, intercalados por estreitas camadas lenticulares de mármore branco. Ocorrem ainda às vezes bancadas pouco espessas de filádios, de composição siliciosa e sericítico-clorítica.
- Unidade constituída por xistos verdes geralmente bastante deformados, com espessura de alguns decímetros, interdigitados de quartzo. Normalmente ocorrem no prolongamento de falhas, sem que tenham sido considerados como material constituinte das respetivas caixas.

Nas imediações da obra foram ainda identificadas rochas filoneanas, com particular destaque para quartzo que ocorre em filonetes de pequena expressão, em lenticulas de geometria sigmóide e a preencher as principais falhas. Foi ainda identificado um filão felsítico a preencher uma falha de atitude WNW, 70°NE, com comprimento de 1m e uma espessura de 0,2 m.

As descontinuidades presentes têm uma atitude e indícios de movimentação que levam a concluir ser herdadas da Orogenia Varisca, mas reativadas pela Orogenia Alpina. As bancadas que constituem o maciço (S_0) encontram-se bem marcadas pelas intercalações das diferentes litologias e assumem uma disposição de 315°, 5°-40°N. A estratificação (S_1) varia com o tipo litológico, apresentando nos estratos mais finos um *fabric* planar, habitualmente designado como xistosidade e, nos mais grosseiros, é materializado pela presença de descontinuidades penetrativas. Nas dobras, a xistosidade materializa o respetivo plano axial com atitude média 295°, 18°N.

O Aproveitamento Hidroelétrico de Picote localiza-se no NE de Portugal continental e em termos geológicos insere-se no Maciço Hespérico e na Zona Centro-Ibérica (Ribeiro, 2006). Segundo Pereira et al. (2000) e Gomes e Alencão (2005), situa-se em terrenos formados durante a Orogenia Hercínica, no final do Paleozóico, e que correspondem a diversas intrusões magmáticas de que resultaram vários granitóides, como é testemunho o de Picote. Esta unidade é designada por "Granito de grão médio, porfiróide, de duas micas (Picote, Bemposta)".

Segundo o estudo geológico-geotécnico realizado para o projeto da obra (EDP, 2006), na região - Figura 3, encontram-se ainda presentes outras três grandes unidades litológicas:

- As formações do Câmbrio Inferior;
- As formações do Câmbrio Médio;
- As formações Mágmatias Intrusivas Ante-hercínicas.

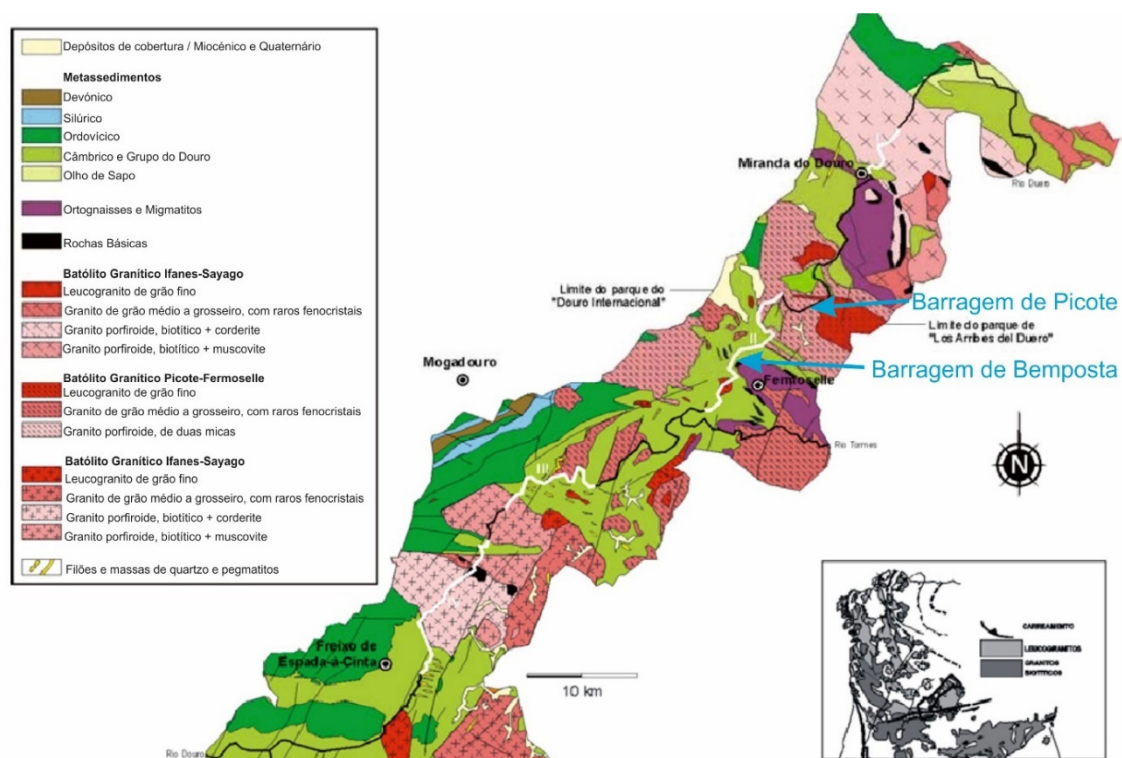


Figura 3 - Infografia do enquadramento geológico do Aproveitamento Hidroelétrico de Picote (adaptado de Gomes e Plaza, 2006)

4 - RESULTADOS

No caso do AHA registaram-se 247 avanços de escavação, correspondendo a um comprimento acumulado de 713 m, ao longo dos quais se realizou a caracterização geotécnica do maciço que permitiu determinar os valores de RMR.

A Figura 4 resume a descrição estatística para os valores de RMR observados, verificando-se a presença de um maciço com valor médio de RMR de 64, mas onde o intervalo mais representado corresponde a índices de 70-75.

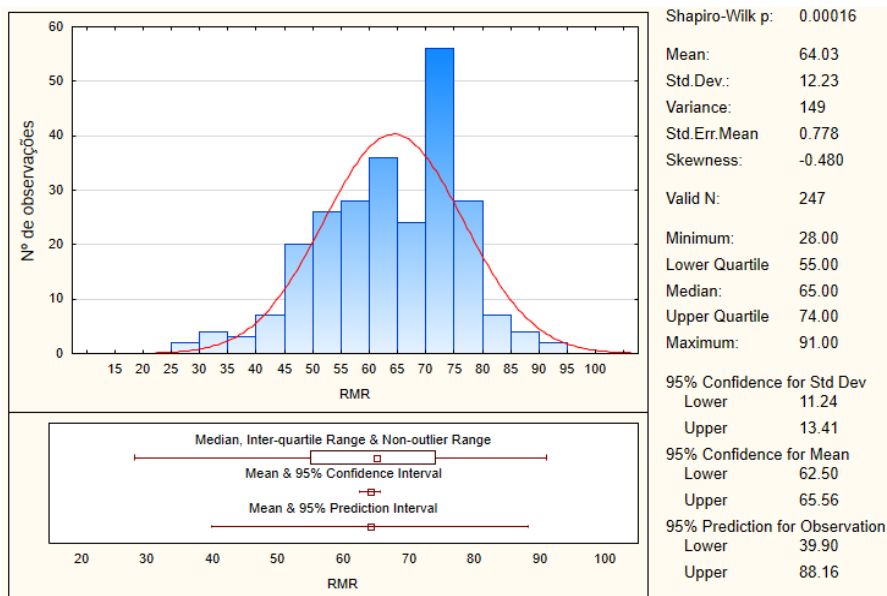


Figura 4 - AHA: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

A estimação da qualidade do maciço para o avanço seguinte da escavação recorrendo a krigagem normal revela valores próximos dos observados, com dispersão idêntica ao longo de toda a escala do índice de RMR - Figura 5.

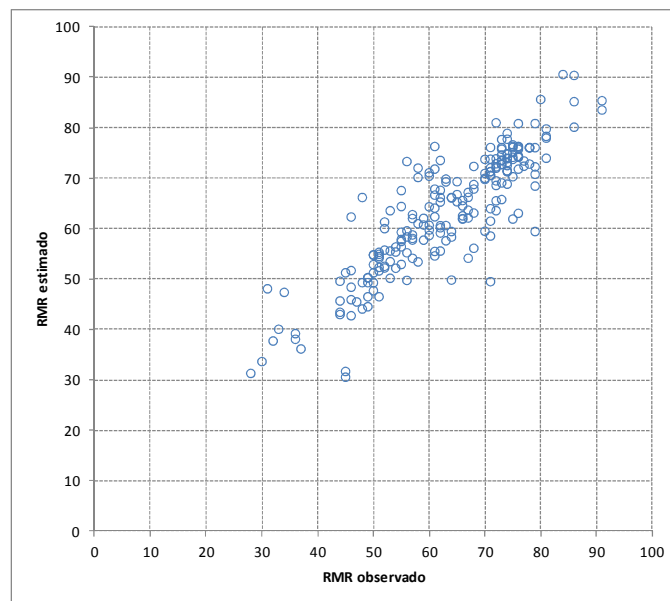


Figura 5 - AHA: RMR estimado e RMR observado

Na Figura 6 é possível observar o erro em função do RMR observado, constatando-se que a amplitude de valores do erro é idêntica ao longo de toda a escala do RMR; no entanto, ele tende a ser negativo para a metade inferior da escala do RMR, indicando que os valores são sobre-estimados, verificando-se uma situação inversa na metade superior da escala de RMR.

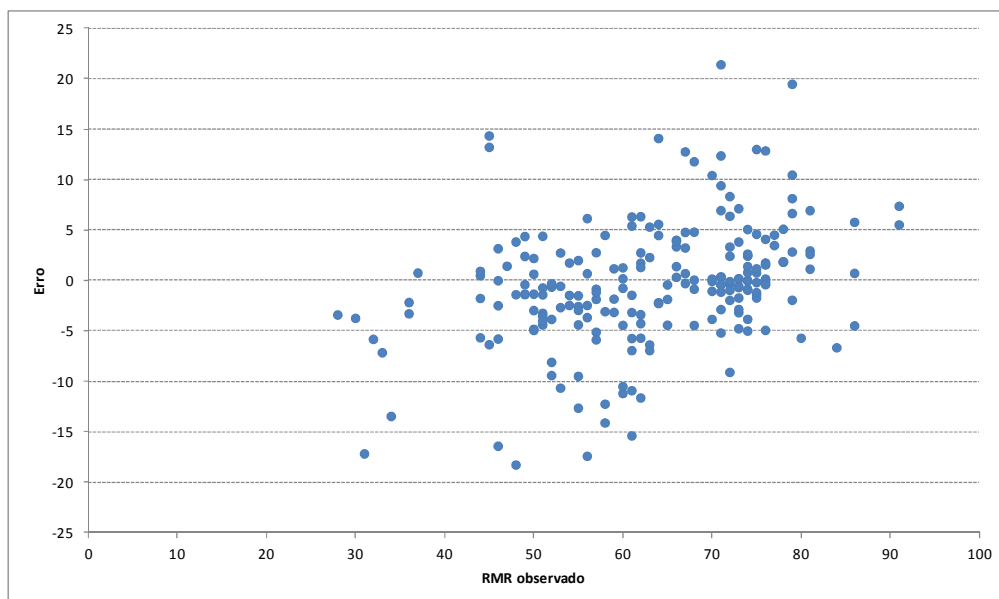


Figura 6 - AHA: Erro em função do RMR observado

No caso do AHP, a descrição estatística dos valores de RMR, obtidos nos 572 avanços de escavação e registados ao longo de 1635 m de túneis e galerias, revelam um maciço de qualidade moderada a boa, com um valor de RMR médio de 65 e com maior representação no intervalo entre 50 e 75 - Figura 7.

A estimação da qualidade do maciço para o avanço seguinte da escavação recorrendo a krigagem normal revela uma dispersão de valores fraca, ou seja, o RMR estimado é semelhante ao RMR observado - Figura 8.

Na Figura 9 é possível observar a distribuição do erro em função do RMR observado, constatando-se resultados idênticos aos verificados para o AHA. A amplitude de valores do erro é idêntica ao longo de toda a escala do RMR; mais uma vez, o erro tende a ser negativo para a metade inferior da escala de RMR, indicando que os valores são sobre-estimados, e situação inversa ocorre na metade superior dessa escala.

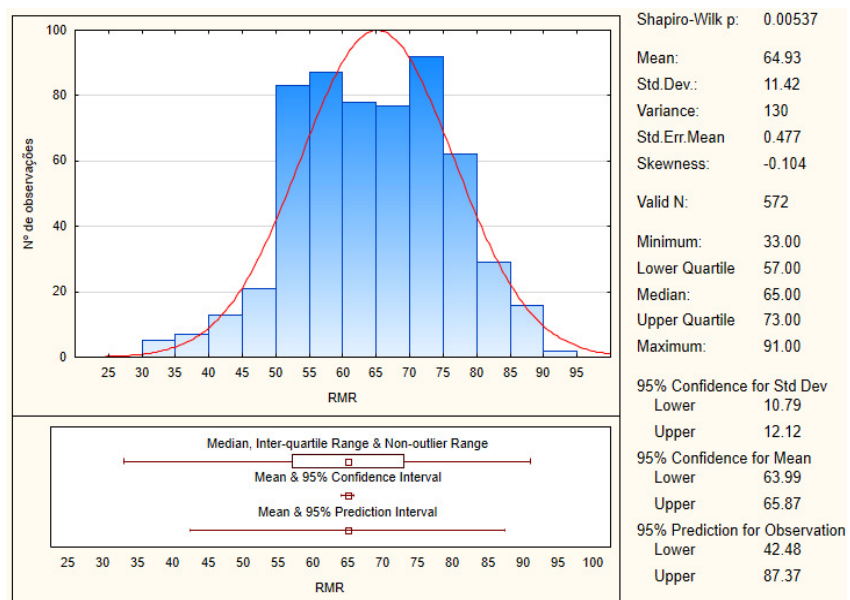


Figura 7 - AHP: estatística descritiva dos valores do índice RMR observados

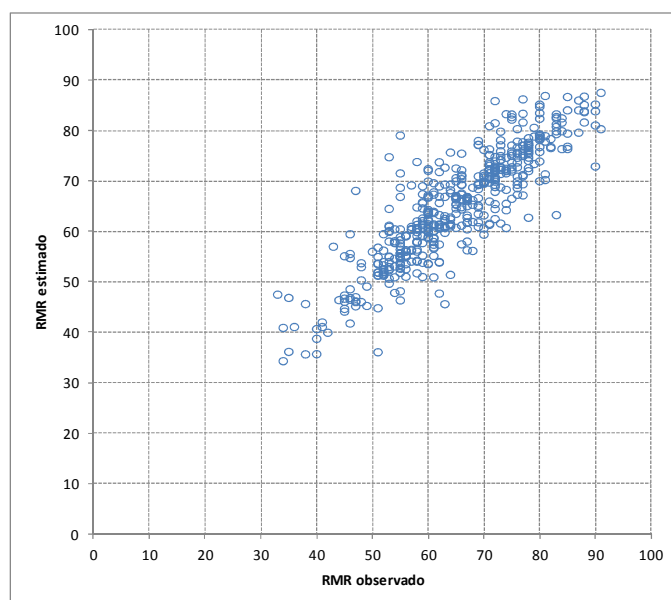


Figura 8 - AHP: RMR estimado e RMR observado

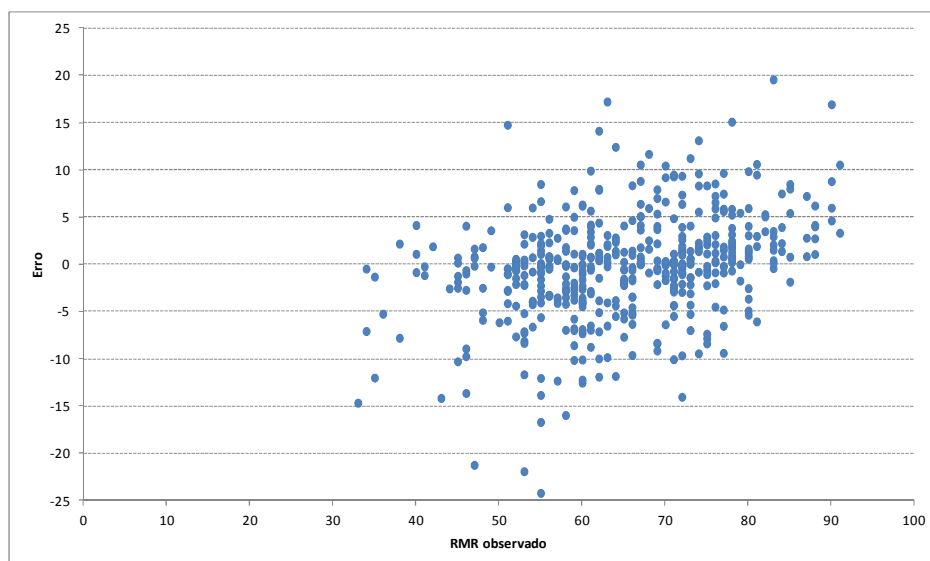


Figura 9 - AHP: Erro absoluto em função do RMR observado

5 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Tendo por base os resultados revelados anteriormente, assim como os sintetizados no Quadro I, verifica-se que, apesar de pertencerem a diferentes contextos geológicos, a qualidade do maciço rochoso, representado pelo índice RMR, é semelhante. Em ambos os casos, os valores de RMR registados seguem uma distribuição centrada, com médias e medianas idênticas. Observa-se um valor de RMR médio próximo de 65 e a amplitude de valores máximos, mínimos e desvios padrão, também são idênticos.

Quadro 1- Comparação dos resultados de AHA e AHP

	RMR observado		RMR estimado		Erro absoluto	
	AHA	AHP	AHA	AHP	AHA	AHP
Número de avanços	247	572	247	572	247	572
Média	63	65	64	65	0	0
Máximo	91	91	91	88	21	20
Mínimo	28	33	31	34	-18	-24
Desvio padrão	12	12	12	11	6	6

Em ambos os casos o erro na estimação dos valores de RMR para o avanço de escavação seguinte, também é semelhante – em média, o valor não difere e, para a maioria das situações, as diferenças são inferiores a 6 pontos da classificação, embora ocorram situações pontuais onde essa diferença vai além de 20.

Verifica-se que o método sobre-estima a qualidade do maciço nas zonas de pior qualidade, pelo que deve ser utilizado com cautela neste contexto.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado insere-se no âmbito de uma investigação mais alargada ligada à gestão do risco geotécnico na construção de túneis por desmonte com explosivo em maciços rochosos (Santos, 2016) e revela que, nos dois casos de estudo apresentados, a qualidade do maciço para a escavação de túneis num contexto metassedimentar é em média idêntica à de um maciço granítico. Sublinha-se assim que que nestes casos, a litologia é irrelevante na qualidade média do maciço rochoso, quando caracterizada pelo índice RMR.

A metodologia utilizada para a estimação da qualidade do maciço, avaliada pelo RMR nas frentes de avanço, apresentou valores muito próximos dos valores observados na frente, independentemente da tipologia e contexto geológico do maciço. Pelo exposto propõe-se que ela seja utilizada para a estimação da qualidade de maciço rochosos nas frentes de escavação de túneis, independentemente do contexto geológico em que estas se insiram; contudo, esta aplicação deve ser cautelosa em zonas com qualidade inferior à média/moda, na medida em que nestas situações a krigagem tende a sobre-estimar a qualidade do maciço.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDP Produção pela autorização concedida para utilizar os dados recolhidos no âmbito do trabalho de execução das suas obras.

Um agradecimento de Vítor Santos à GEOÁREA por possibilitar a realização do presente artigo.

O trabalho desenvolvido no GeoBioTec teve o apoio do projeto UID/GEO/443 04035/2013.

REFERÊNCIAS

- Araújo, J., Almeida, P. de., Borrego, J., Pedro, J. e Oliveira, T. (2006) - As regiões central e sul da Zona de Ossa Morena. In R. Dias, P. Terrinha, & K. J. (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*. Universidade de Évora.
- Barla, G., Scavia, C., Antonellis, M. e Garascio, M. (1987) - Characterization of rock mass by geostatistical analysis at the Masua Mine. In *Proceedings of 6th ISRM Congress* (pp. 777–786). Montreal, Canada.
- Barros, A., Carvalhosa, e Galopim de Carvalho, A. (1970) - Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000 e Notícia Explicativa da Folha 43-B (Moura).

- Bieniawski, Z. (1989) - Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons.
- Castro-Fresno, D., Diego-Cabrera, R., Ballester, F. e Álvarez-García, J. (2010) - Correlation between Bieniawski's RMR and Barton's Q index in low-quality soils. *Revista de La Construcion*, 9(1), 107–119.
- Choi, J. Y., Yoon, S. Y. e Park, H.-D. (2009) - Tunneling Analyst: A 3D GIS extension for rock mass classification and fault zone analysis in tunneling. *Computer & Geosciences*, 35, 1322–1333.
- COBA. (2007) - Reforço de potência do escalão de Alqueva. Estudo Geológico-Geotécnico (não publicado).
- EDP. (2006) - Aproveitamento hidroelétrico do Douro Internacional - Reforço de Potência de Picote - Estudo Geológico Geotécnico (não publicado).
- Exadaktylos, G. e Stavropoulou, M. (2008) - A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: Analytical relations and computational scheme. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (45), 1102–1125.
- Gomes, E. e Alencão, A. (2005) - Património geológico transfronteiriço na Região do Douro: Roteiros. Vila Real.
- Gomes, E. e Plaza, M. (2006) - Itinerários geoturísticos: um suporte aos percursos de barco nas albufeiras do Douro Internacional (Arribas do Douro). Retrieved November 7, 2012, from <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/cz9.pdf>
- Kaewkongkaew, K., Phien-wej, N. e Kham-ai, D. (2015) - Prediction of rock mass along tunnels by geostatistics. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 81–90.
- Oh, S., Chung, H. e Lee, D. (2004) - Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation. *Environmental Geology*, (46), 1070–1078.
- Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M. T. e Monteiro, J. H. (1992) - Carta Geológica de Portugal na escala 1:500000.
- Olivença, P. e Santos, V. (2014) - Geological and Geotechnical difference on both sides of the same tunnel. In G. Lollino (Ed.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6. IAGE XII Congress* (pp. 47–51). Turin.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Marques, F., Munhá, J., Castro, P., Meireles, C. e Ferreira, N. (2000) - Carta Geológica de Portugal à escala 1:200000 – Folha 2.
- Pinheiro, M., Vallejos, J., Miranda, T. e Emery, X. (2016) - Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: a case study with rock mass rating. *Engineering Geology*, 205.
- Ribeiro, A. (2006) - A evolução geodinâmica de Portugal. In R. Dias, A. Araújo, P. Terrinha, & J. C. Kulberg (Eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (pp. 1–27). Évora: Universidade de Évora.
- Ryu, D. W., Kim, T. K. e Heo, J. S. (2003) - A study on geostatistical simulation technique for the uncertainty modeling of RMR. *Tunnel & Underground*, 13, 87–99.
- Santos, V. (2016) - Gestão de riscos geotécnicos na construção de túneis em maciços rochosos. Dissertação de doutoramento. FCT-UNL.
- Stavropoulou, M., Exadaktylos, G. e Saratsis, G. (2007) - A Combined Three-Dimensional Geological-Geostatistical-Numerical Model of Underground Excavations. *Rock. Rock Mech & Rock Eng*, (40), 213–243.
- Yi, H., Choi, Y. e Park, H. D. (2014) - Application of multiple indicator Kriging for RMR value estimation in areas of new drift excavation during mine site redevelopment. *Environmental Earth Sciences*, 71(10), 4379–4386.
- You, K., e Lee, J. (2006) - Estimation of rock mass classes using the 3-dimensional multiple indicator kriging technique. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (3/4), 229